ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA NA MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE VARIAÇÕES DA PERMEABILIDADE EM UM TUBO EM AÇO CARBONO ISOLADO TERMICAMENTE

Gabriel S. Cortes[1], Ivan C. Silva[2], Cláudia T. T. Farias[3]

Resumo
Tubulações e equipamentos metálicos em plantas industriais estão constantemente sujeitos a processos corrosivos, os quais deterioram a parede destes componentes, encurtam a vida útil e limitam as condições de operação. A técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas (*PEC*, *Pulsed Eddy Current*) pode ser eficaz na inspeção de materiais metálicos revestidos, uma vez que possibilita a inspeção de equipamentos em operação, sem a retirada do revestimento. A técnica de *PEC* utiliza-se de propriedades magnéticas e, como desvantagem, há a possibilidade das inspeções em materiais ferromagnéticos serem complexas, por conta das variações de condutividade elétrica e, principalmente, de permeabilidade magnética. Este trabalho estuda a influência da saturação magnética, na minimização dos efeitos de variações de permeabilidade, em um tubo em aço carbono isolado termicamente. Foi desenvolvido um modelo por elementos finitos (*FEM*, *Finite Element Modeling*), o que permitiu avaliar o campo magnético no interior da sonda, em função da presença de descontinuidades em diferentes profundidades.

Palavras-chave: Ensaios Não Destrutivos, Correntes Parasitas Pulsadas, Permeabilidade Magnética, Método dos Elementos Finitos.

Abstract
Corrosive processes constantly deteriorate the surface of pipes and metal equipment in industrial facilities, shortening the useful life and limiting the operating conditions. Pulsed eddy current (PEC) is a non-destructive technique that can be effective in inspecting metallic substrate, coated with nonmagnetic insulation, since it empowers the inspection of equipment in operation without removal of the coating. The PEC technique employs magnetic properties and, as disadvantage, it is possible that inspections on ferromagnetic materials are complex due to variations in electrical conductivity and magnetic permeability. This work studies the influence of magnetic saturation looking for minimizing the effects of permeability variations on a thermally insulated carbon steel tube. A finite element model has been developed to evaluate the magnetic field inside the probe, due to the presence of discontinuities at different depths.

Keywords: Nondestructive Testing, Pulsed Eddy Current, Electromagnetic Permeability, Finite Element Method.

[1] Graduando, Engenharia Industrial Mecânica – GPEND/LABIND/IFBA
[2] Prof. Dr. em Eng. Metalúrgica e de Materiais – GPEND/LABIND/IFBA
[3] Prof.a Dr.a em Eng. Metalúrgica e de Materiais – GPEND/LABIND/IFBA

1. Introdução

Tubulações e equipamentos metálicos em plantas industriais estão constantemente sujeitos a processos corrosivos ou trincas durante a operação (Santos *et al.*, 2014). Visando contornar esta condição ou prevenir contra a corrosão é aplicado revestimento estrutural na parte externa dos tubos (Tian *et al.*, 2007). Mesmo aplicando materiais diversos como revestimento, processos corrosivos podem ocorrer na superfície externa do tubo, caracterizando um processo de corrosão sob isolamento (*CUI, Corrosion Under Insulation*) (Vogelaere, 2008), ou na superfície interior do tubo que fica em contato com os produtos, conduzindo ao desenvolvimento de trincas e perda de espessura (Cheng, 2012).

A técnica de correntes parasitas pulsadas progride no universo de ensaios não destrutivos, (Arjun *et al.*, 2015; Yoseph, 2000). Devido à alta sensibilidade, robustez, vasta gama de frequências e à viabilidade de realizar inspeções em materiais metálicos isolados (Silva *et al.*, 2014), é cada vez mais empregada tanto na detecção e dimensionamento de falhas (Tian *et al.*, 2005) em recipientes de pressão, tubos de petróleo, estruturas aeroespaciais, quanto na medição de espessuras e propriedades estruturais (Sophian *et al.*, 2001).

Os tubos de aço carbono são ferromagnéticos, onde variações de condutividade elétrica e permeabilidade magnética afetam os resultados (Wohlfarth, 2004). Dados obtidos experimentalmente empregando correntes parasitas pulsadas podem originar confusão na detecção visual e dimensionamento dos defeitos por conta de resquícios de magnetização (Yang, Tai, 2002). Visando contribuir para a solução deste problema, neste trabalho é feito um estudo sobre o efeito da saturação magnética na resposta de uma sonda *PEC*.

Técnicas de modelagem são aplicadas em busca do aperfeiçoamento e otimização da configuração experimental (Mizukami *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2017), pois através deste método, modificações podem ser realizadas antes da montagem experimental, permitindo predeterminar parâmetros mais eficientes. Neste estudo foi realizada uma simulação utilizando o método dos elementos finitos a fim de investigar a saturação magnética de tubos aço carbono e na tentativa de prever a resposta da sonda na presença de descontinuidades.

2. Fundamentação teórica

2.1. *Pulsed Eddy Current* (*PEC*)

Na busca de descontinuidades em corpos de prova metálicos, a técnica de correntes parasitas pulsadas tem suas vantagens. Utilizada na inspeção não destrutiva, esta técnica faz uso de repetitivos pulsos de onda quadrada de curta duração para excitar uma bobina que induz um campo magnético ao se aproximar do material metálico. Correntes parasitas são, então, induzidas no corpo de prova, que geram um campo magnético secundário de mesma direção, mas com sentido contrário ao da bobina. Finalmente, os dois campos magnéticos são lidos pelo sensor dentro da bobina de excitação e, a partir do sinal diferencial resultante da subtração entre os campos magnéticos primário (referência) e secundário (resposta), pode-se extrair parâmetros que servirão para a detecção de descontinuidades no tubo (Sophian *et al.*,

2003). A identificação do defeito se concentra, em muitos casos, na análise do transiente no domínio do tempo (Bieber *et al.*, 1997).

2.2. Magnetização

Os materiais ferromagnéticos e paramagnéticos dispõem de uma estrutura que atua como pequenos ímãs, esta estrutura é conhecida como dipolos magnéticos. Estes dipolos, ao serem expostos a um campo magnético externo com certa força, alinham-se às linhas deste campo, reforçando a sua intensidade. Este ordenamento não é espontâneo, pois sem a presença de uma excitação, os dipolos não tenderiam ao alinhamento, adquirindo orientações aleatórias. Com a remoção do campo magnético indutor, observa-se que os dipolos em metais paramagnéticos adquirem orientações dispersas, entretanto, os ferromagnéticos mantêm o alinhamento, além de gerar seu próprio campo de baixa intensidade (McHenry e Laughlin, 2012; Tanase *et al.*, 2001; Geiefithst, 1968). Neste estudo, ímãs, interligados através de um yoke magnético de aço (Sophian, 2003a), foram utilizados buscando minimizar efeitos de variações de permeabilidade.

2.3. Método dos Elementos Finitos

A ideia básica do método dos elementos finitos (*FEM*, *Finite Element Modeling*) é desagregar toda a estrutura conjunta em pequenas unidades finitas para representar os objetos complexos, onde as unidades são conectadas por nós e sem que haja alteração das propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados (Babbar e Harlley, 2010; Patel e Rodger, 1996). O *FEM* pode ser utilizado em diversas áreas das ciências exatas e biológicas e, devido à sua grande aplicabilidade e eficiência (Salles, 2008), é utilizado em pesquisas, possuindo vantagens em relação a outros métodos disponíveis. Neste trabalho, o *FEM* é utilizado para simular um modelo de configuração experimental, composto por tubo, revestimento, sonda, yoke e ímãs.

3. Materiais e métodos

A partir de um corpo de provas tubular de aço 1020, com revestimento de silicato de cálcio e reduções de espessura na superfície externa, foi criado um modelo de elementos finitos da configuração tubo-bobina-ímãs. O corpo de provas utilizado no trabalho experimental foi cedido pelo CENPES-PETROBRAS. com espessura de 6mm, contendo 5 defeitos superficiais usinados, de 80mm de comprimento e profundidade variando de 1 a 5mm, estando coberta por uma camada de 37mm de silicato de cálcio e uma fina folha de alumínio com 0,5mm de espessura, figura 1.

A sonda do modelo consta de uma bobina geradora de campo magnético com as seguintes configurações: diâmetro externo 33 mm; diâmetro interno 17mm; altura 20mm e 500 voltas. Dois ímãs N30, comprimento 50mm e altura de 6mm foram empregados para magnetizar o

corpo de prova. Os sinais foram medidos no centro da sonda, a uma altura de 2,5mm a partir do *lift-off*.

Os ímãs, bobina e um yoke de aço foram posicionados sobre uma sapata com a curvatura do tubo, acrescentando uma distância de 3mm entre a bobina e o revestimento, totalizando o *lift-off* de 40,5mm. O modelo 2D por elementos finitos foi desenhado, construído e analisado através do *software* computacional Ansys Maxwell®, parte do conjunto ANSYS Electromagnetics Suite®, na condição sem defeito e para diferentes reduções de espessura da parede do tubo, que variam de 1 a 5mm.
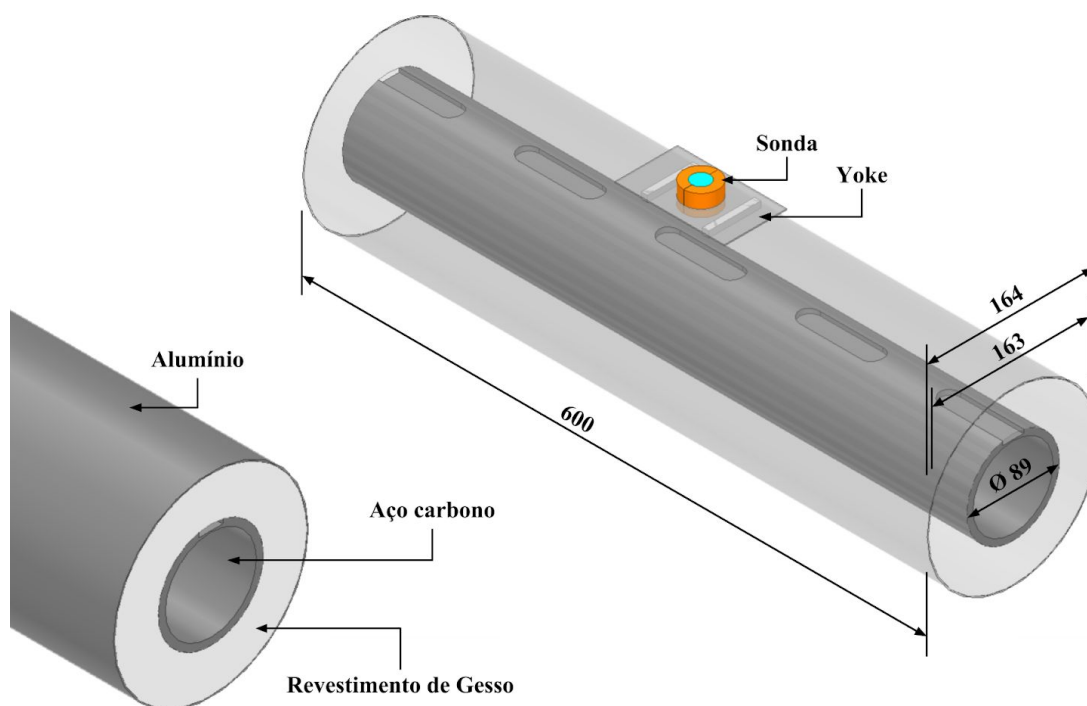
Figura 1 - Corpo de prova revestido em silicato de cálcio (mm).

4. Resultados

Geralmente, observa-se no transiente que o decaimento dos sinais referentes às áreas com perdas de espessura é mais acentuado que da condição sem defeito. Isto ocorre, pois a queda do sinal é modificada devido à relação entre a espessura superficial do tubo e o espaço para difusão das correntes parasitas. A concentração do campo é realçada na figura 2.
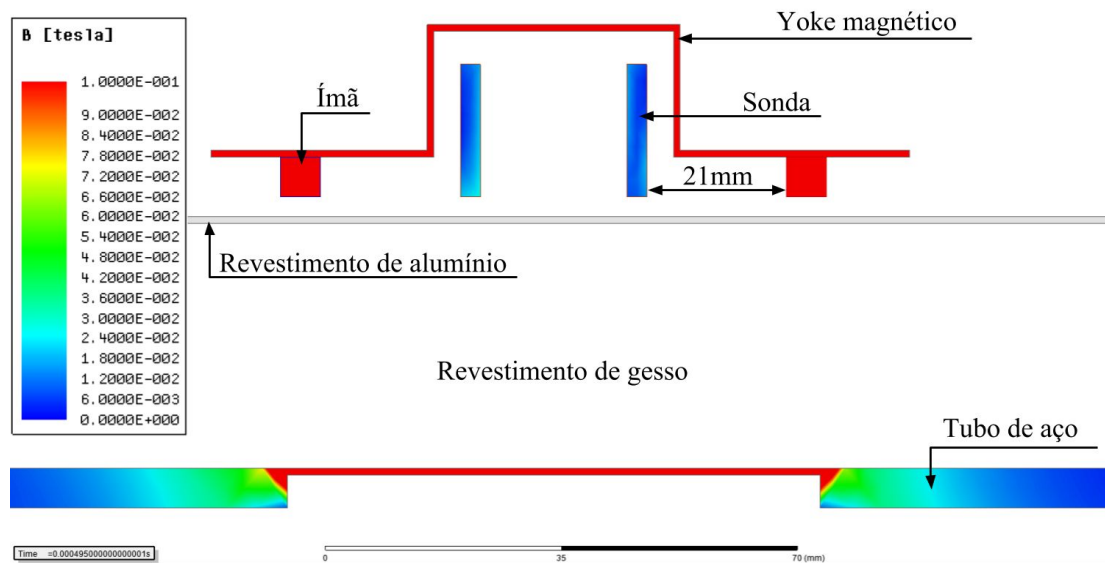
Figura 2 - Campo magnético, defeito interno de 5mm.

Pode-se observar na modelagem um decaimento maior da região sem defeito que das área com perdas de espessura, como visto por Sophian (2003a), em que ao saturar magneticamente a superfície do tubo, ocorre uma inversão na sequência de decaimento do transiente, o que não limita a técnica na busca de defeitos.

As leituras dos campos magnéticos obtidos no interior da sonda são mostrados na figura 3, onde pode-se notar alguns sinais sobrepostos, mesmo com a ampliação, dificultando a separação visual dos defeitos ao analisar o sinal bruto no domínio do tempo.
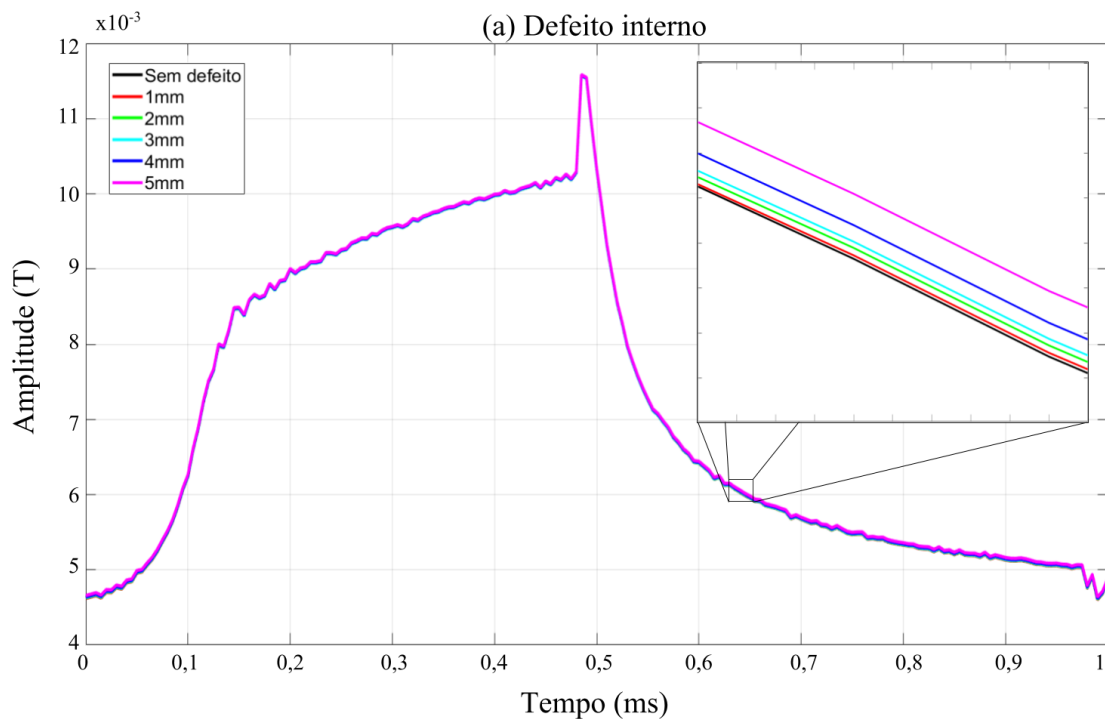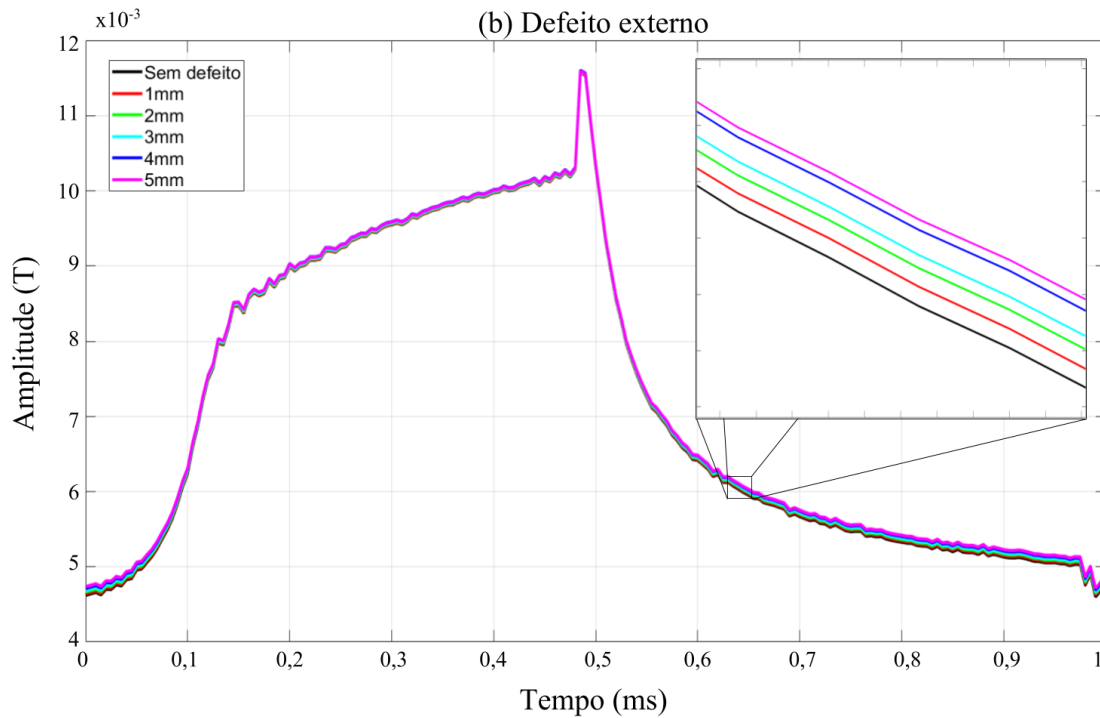
Figura 3 - Campo magnético em reduções de espessura: (a) na superfície interna do tubo; (b) na superfície externa do tubo.

Através dos sinais diferenciais, apresentados na figura 4, é possível compará-los mais facilmente, reduzindo erros de interpretação por conta de sobreposições de sinais. O resultado diferencial sem defeito encontra-se na amplitude zero, ao passo que ao aumentar a perda de material sob isolamento (figura 4-b) a separação entre as diferentes espessuras começa a ser notada a partir de 0,5ms de forma acentuada, permitindo a sua discriminação de forma visual.
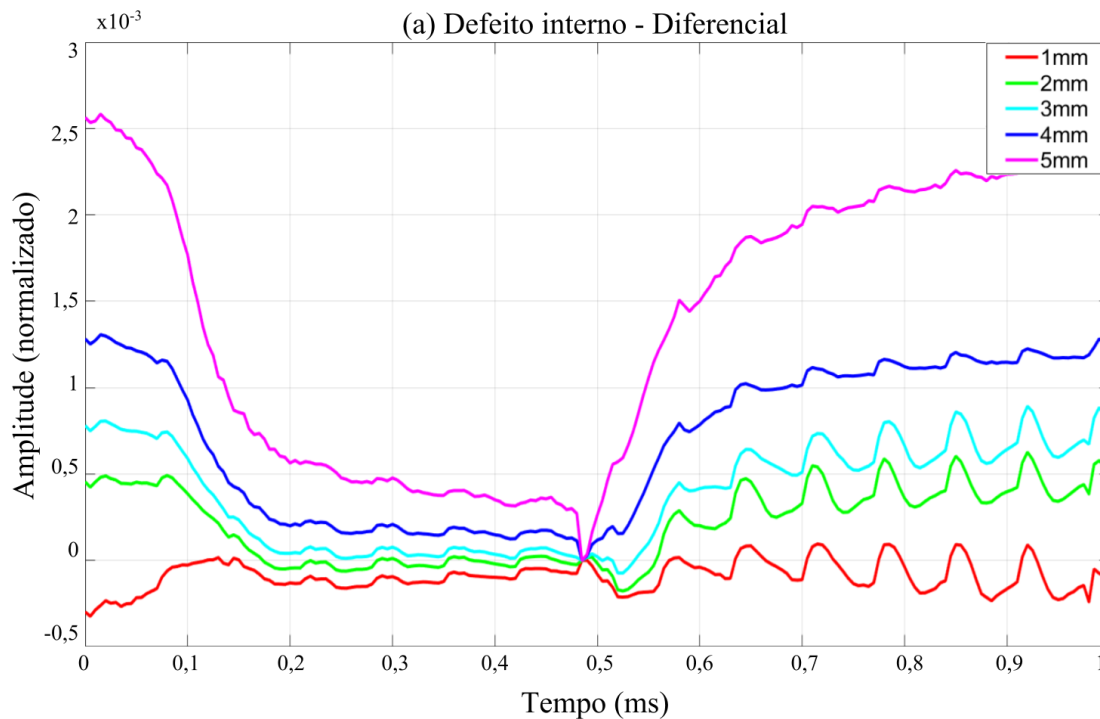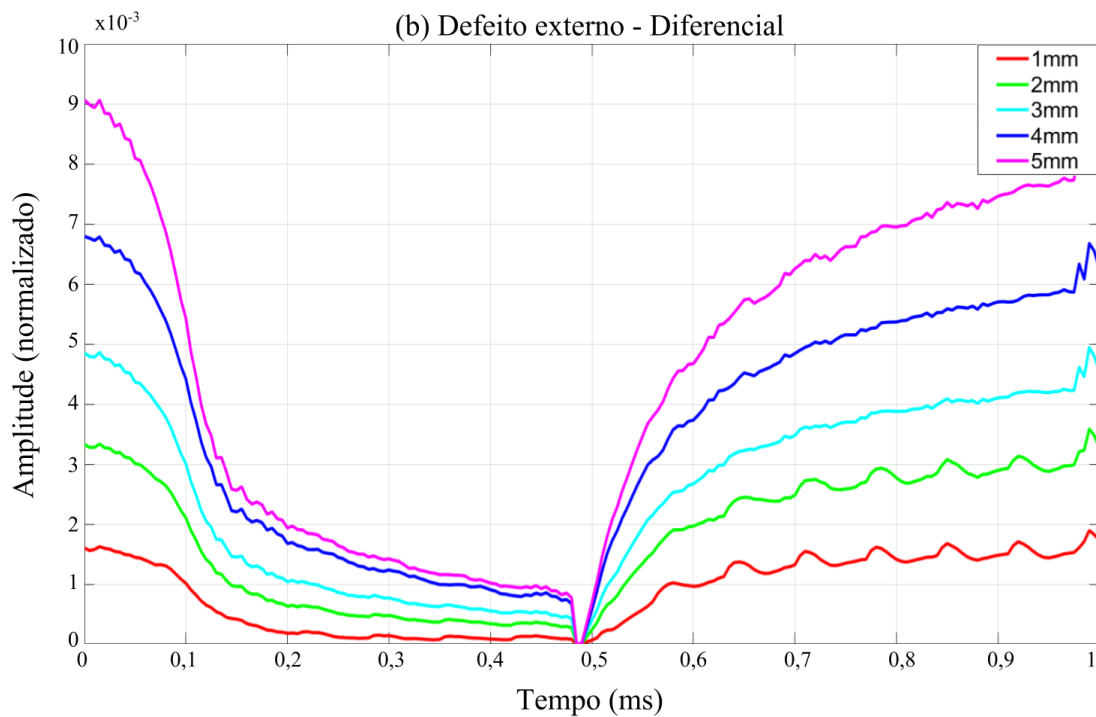
Figura 4 - Sinais diferenciais do campo magnético em reduções de espessura: (a) na superfície interna do tubo; (b) na superfície externa do tubo.

5. Conclusões

O método de modelagem por elementos finitos foi eficiente em reproduzir o sinal da sonda PEC na configuração tubo-ímãs-bobina. Através da associação entre saturação magnética e a técnica PEC foi possível separar os sinais do tubo de aço revestido com silicato de cálcio, em regiões sem defeito e com perda de espessura.

A distância de posicionamento dos imãs de melhor desempenho foi de 21mm, onde a partir da análise do transiente foi possível visualizar a distribuição do campo magnético e detectar defeitos em ambas as paredes do tubo sob o revestimento de 37mm.

Como trabalhos futuros, serão empregados a validação dos parâmetros do modelo referentes ao tubo e o emprego do sinal experimental comparado à bobina modelada.

6. Agradecimentos

Ao IFBA e a FAPESB pelo apoio institucional e financeiro.

7. Referências

ARJUN V., SASI B., RAO B. P. C., MUKHOPADHYAY C. K., JAYAKUMAR T. Optimization of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates. Sensors and Actuators A: Physical, 226 69-75, (May) 2015.

BABBAR V. K., HARLLEY D., KRAUSE T. W. Finite elements modeling of pulsed eddy current signals from aluminum plates having defects. Department of Physics, Royal Military College of Canada, Kingston, (Fev) 2010.

BIEBER J. A., SHALIGRAM S. K., ROSE J. H., MOULDER J. C. Time-Gating of Pulsed Eddy Current Signals for Defect Characterization and Discrimination in Aircraft Lap-Joints, in: Thompson D.O., Chimenti D.E. (eds) Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Springer, Boston, MA, 16 1915-1921, 1997.

CHENG W. Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding. Springer-Verlag, 31 215-224, (Mar) 2012.

GEIEFITHST R. B. Free Energy of Interacting Magnetic Dipoles. as part of Physical Review, 176 655-659, (Dez) 1968.

MACHADO M. A., ROSADO L., PEDROSA N., VOSTNER A., MIRANDA R. M., PIEDADE M., SANTOS T. G. Novel eddy current probes for pipes: Application in austenitic round-in-square profiles of ITER. NDT & E International, volume 87, 111-118, (April) 2017.

MCHENRY M. E., LAUGHLIN D. E. Magnetic Moment and Magnetization, in Characterization of Materials, John Wiley & Sons, (May) 2012.

MIZUKAMI K., MIZUTANI Y., TODOROKI A., SUZUKI Y. Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing. Composites Part B: Engineering, volume 86, 84-94, (February) 2016.

PATEL U., RODGER D. Finite Element Modelling Of Pulsed Eddy Currents For Nondestructive Testing. Transactions on Magnetics. vol. 32, num. 3, (Mar) 1996.

SALLES F. P. Aplicação do método de elementos finitos para aprimoramento da análise de motores de indução trifásicos acionados por inversores. Dissertação em engenharia elétrica – UFRJ. Rio de Janeiro, p. 26, 2008.

SANTOS Y. T., SILVA G. P., SILVA I. C., SILVEIRA T., FARIAS C. T. Ultrasonic Non-destructive Evaluation of Isothermal Aging in HP Steels. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, Czech Republic, 1-8, (Oct) 2014.

SILVA I. C., SANTOS Y. T. B., BATISTA L. S., FARIAS C. T. Corrosion Inspection Using Pulsed Eddy Current. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, Czech Republic, 1-9, (Oct) 2014.

SOPHIAN A., TIAN G. Y., TAYLOR D., RUDLIN J. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT. NDT & E International, 36 37-41, (Jan) 2003a.

SOPHIAN A. Characterisation of surface and sub-surface discontinuities in metals using pulsed eddy current sensors. Thesis (Ph.D.), University of Huddersfield, (Oct) 2003b.

SOPHIAN A., TIAN G. Y., TAYLOR D., RUDLIN L. Electromagnetic and eddy current NDT: A review, in Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 43 308-313, (May) 2001.

TANASE M., BAUER L. A., HULTGREN A., SILEVITCH D. M., SUN L., REICH D. H., SEARSON P. C., MEYER G. J. Magnetic Alignment of Fluorescent Nanowires. as part of Nano Letters, 2001, 1 (3), pp 155–158, American Chemical Society, (Mar) 2001.

TIAN B. R., CHENG Y. F. Electrolytic deposition of Ni–Co–Al2O3 composite coating on pipe steel for corrosion/erosion resistance in oil sand slurry. Electrochimica Acta, 53 511-517, (Jul) 2007.

TIAN G. Y., SOPHIAN A., TAYLOR D., RUDLIN J., Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment, IEEE Sensors Journal, 5 90-6, (Feb) 2005.

VOGELAERE F. Corrosion Under Insulation. Wiley InterScience, 1-6, (Nov.) 2008.

WOHLFARTH E. P. Relations between Different Modes of Acquisition of the Remanent Magnetization of Ferromagnetic Particles. Journal of Applied Physics (1958), 29 595-595, (Jun) 2004.

YANG H., TAI C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate. in Measurement Science and Technology, vol. 13, num. 8, (Jul) 2002.

YOSEPH B. C. Emerging NDE Technologies and Challenges at the Beginning of the 3rd Millennium - Part I. Materials Evaluation, 58 17–30, (Jan) 2000.